

Rapport annuel 2001, 22 décembre 2001

Optimisation d'installations solaires thermiques combinées

Auteur et coauteurs	Abderrahim Gherbi (IA-EPFL), Olivier Renault, Jacques Bony (eivd, HES -SO)
Institution mandatée	Institut d'automatique DGM – EPFL
Adresse	Ecublens, CH – 1015 Lausanne
Téléphone, e-mail, site Internet	(021) 693 – 5168, denis.gillet@epfl.ch , solarplant.eivd.ch
N° projet / n° contrat OFEN	36510 / 76325
Durée prévue	Du 1er janvier 2000 au 31 décembre 2001

RESUME

Ce rapport présente les résultats d'une étude réalisée sur une installation solaire combiné *Arpège*. Ce système permet à la fois de chauffer un bâtiment et de fournir l'eau chaude sanitaire en couplant une source d'appoint fossile - gaz ou mazout - avec 8 à 16 m² de capteurs solaires thermiques plans. Cette étude s'est déroulée en trois phases.

La première phase a consisté à mesurer les performances d'un système solaire combiné *Arpège* installé dans une maison familiale. Les résultats obtenus montrent une économie d'énergie d'appoint de 25% pour une consommation en chauffage et en eau chaude de plus de 15000 kWh/an.

La deuxième phase a concerné la réalisation d'améliorations structurelles sur une installation au LESBAT de l'EIVD. Les gains obtenus ont été mesurés. La production industrielle actuelle de la cuve intégrant une partie des modifications permet une diminution des pertes thermiques d'environ 35%, ce qui entraîne une diminution de la consommation d'énergie fossile de 17%.

La troisième et dernière phase a porté sur l'élaboration d'une commande prédictive. Cette commande prend en compte les prévisions météorologiques, les caractéristiques de l'installation solaire et celles du bâtiment. Ainsi, elle optimise la gestion énergétique globale de l'installation. Afin de comparer les performances de cette commande avec celles d'une commande existante du commerce, plusieurs moyens ont été mis en œuvre. Il s'agit d'une part d'une installation de laboratoire reproduisant les apports solaires et la demande en énergie-chaleur et d'autre part de l'élaboration d'une météorologie avec prévisions à court terme.

Une collaboration avec l'Agence Internationale de l'Energie (IEA – Tâche 26 Solar combisystems) mettant en commun le travail de plusieurs équipes a permis de souligner l'importance de l'influence de plusieurs composants (brûleur, isolation...). Par simulation, selon la demande d'énergie -chaleur du bâtiment (type maison familiale), l'économie d'énergie d'appoint obtenu avec une installation solaire combinée type *Arpège* varie entre 20 et 50 % pour le climat du plateau suisse.

TABLE DES MATIERES

1.	Buts du projet	3
2.	Travaux effectués et résultats acquis	4
2.1.	Mesures in-situ	4
2.2.	Modifications structurelles	4
2.2.1.	Résumé des améliorations structurelles effectuées entre 1999 et 2001	6
2.3.	Développement d'une commande optimale	7
2.3.1.	Objectifs de l'optimisation	7
2.3.2.	La commande optimale	7
2.3.3.	Optimisation du débit solaire	9
2.3.4.	Optimisation de la puissance de chauffage	11
2.3.5.	Commande de la température dans le bâtiment	15
2.3.6.	Validation de la commande optimale	18
2.3.7.	Conditions des essais en laboratoire	Erreur ! Signet non défini.
	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
	Choix du fichier météorologique	Erreur ! Signet non défini.
	La qualité des prévisions météorologiques	Erreur ! Signet non défini.
	Caractéristiques thermiques du bâtiment	Erreur ! Signet non défini.
	Demande en eau chaude et en chauffage	Erreur ! Signet non défini.
	La robustesse de la commande face aux erreurs et aux perturbations	Erreur ! Signet non défini.
3.	Collaboration nationale	Erreur ! Signet non défini.
4.	Collaboration internationale	Erreur ! Signet non défini.
5.	Évaluation de l'année 2001 et perspectives pour 2002.	Erreur ! Signet non défini.
5.1.	mesures in-situ	Erreur ! Signet non défini.
5.2.	Mesures thermiques et améliorations structurelles	Erreur ! Signet non défini.
5.3.	Commande optimale prédictive	Erreur ! Signet non défini.
5.4.	Collaboration internationale	Erreur ! Signet non défini.
6.	Références	Erreur ! Signet non défini.

1. BUTS DU PROJET

Plusieurs entreprises nationales et internationales actives dans le domaine du solaire proposent depuis peu des installations solaires compactes combinées essentiellement destinées aux particuliers. Récentes, ces installations sont encore peu répandues sur le marché suisse et susceptibles de pouvoir être améliorées.

Ce projet avait donc pour but d'évaluer les systèmes de commande actuels et les performances des installations solaires thermiques combinées sur une installation *in situ*, de proposer des améliorations pour économiser l'énergie d'appoint et d'augmenter le confort des utilisateurs, ainsi que de démontrer les gains apportés par des modifications structurelles de l'installation pilote.

Durant l'année 2001 nous avons essayé de diminuer encore les pertes thermiques de l'installation solaire combinée étudiée. Nous avions également comme objectif de terminer la campagne de mesures sur une installation *in-situ* et de vérifier si celles-ci correspondaient aux résultats obtenus par simulation. D'autre part, l'étude des mouvements convectifs à l'intérieur de la cuve à l'aide de 55 sondes devait permettre de réaliser des modifications structurelles pertinentes. Enfin, la mise au point d'une régulation fonctionnant avec un modèle dynamique élaboré du bâtiment et de l'installation ainsi qu'avec la prévision météorologique à court terme devait permettre de diminuer la consommation d'énergie d'appoint et d'augmenter le confort.

L'installation-pilote testée est un système *Arpège de l'entreprise Agena Energies* disponible à l'Ecole d'ingénieurs d'Yverdon alors que l'installation *in situ* est située à Dombresson (NE).

2. TRAVAUX EFFECTUÉS ET RESULTATS ACQUIS

Les 3 axes suivants ont été développés durant l'année 2001 :

- Les mesures in-situ
- Les modifications structurelles du système combiné
- Le développement d'une commande optimale

2.1. MESURES IN-SITU

Une installation solaire combinée *Arpège* située dans une maison individuelle a été instrumentée.

Caractéristiques :

- 12 m² de capteurs thermiques plans
- 900 litres de stockage thermique (eau)
- 300 MJ/m².an d'indice de dépense d'énergie en chauffage de la maison

Les résultats fournis par nos mesures sont représentatifs des possibilités d'exploitation de l'énergie solaire pour le chauffage et l'eau chaude sur le Plateau suisse et sans stockage à long terme.

Le taux d'économie d'énergie d'appoint f_{sav} obtenu atteint environ 25%.

La simulation démontre que l'augmentation de l'isolation de la cuve et l'ajout de chicanes pour éviter les boucles de convection dans les conduites permettent d'augmenter le taux d'économie d'énergie d'appoint f_{sav} d'environ 4 points. L'adjonction de 4m² supplémentaires de capteurs permet un gain de 3 à 5 points sur le f_{sav} .

Pour plus de détail, un rapport complet con tenant les conditions de mesures et les résultats détaillés a été rédigé en août 2001 [1].

2.2. MODIFICATIONS STRUCTURELLES

Durant l'année 2001, nous avons réalisé des modifications structurelles sur l'installation *Arpège* en plus de celle déjà réalisées en 2000 (isolation supplémentaire, chicanes anti -convectives sur les sorties en bas de cuve). Les pertes thermiques de la cuve ont évolué d'une valeur de 6,4 W/K après les premières modifications en 2000 à 5,5 W/K actuellement.

Les modifications réalisées en 2001, soit l'isolation en bas de cuve, la pose de chicanes empêchant la convection dans la partie solaire et l'ajout d'une planche en bois sous la cuve ne diminuent que marginalement les pertes thermiques. La diminution de ces pertes est compensée par une température plus élevée dans la cuve et en particulier dans la partie inférieure. En conséquence, l'échangeur solaire étant en bas de cuve, l'énergie fournie par les capteurs solaires est moins importante. En comparant le f_{sav} annuel, on constate que le taux d'économie d'énergie d'appoint est identique entre 2000 et 2001.

Année 1999	Pertes thermiques de l'accumulateur [kWh] (diminution relative)	Améliorations effectuées	Temp. annuelle moyenne de la cuve [°C]	f_{sav} et (gains relatifs)
	2760 référence	⟨ Système sans amélioration	49.2	28 % référence
Année 2000	2659 (- 4 %)	⟨ Ajout d'un brise jet sur le retour chauffage	48.4	29.3 % (+ 5 %)
Année 2001	1833 (- 34 %)	⟨ Amélioration de l'isolation de la flasque autour du brûleur ⟨ Adjonction de chicane anti-convective sur les conduites chauffage	50.7	32.8 % (+17 %)
Année 2002	1726 (- 37 %)	⟨ Amélioration de l'isolation en bas de cuve ⟨ Adjonction de chicane anti-convectives sur les conduites départ et retour capteurs solaires ⟨ Ajout d'une planche en bois recouverte d'aluminium sous l'accumulateur	51.1	32.8 % (+17 %)
	1624 (- 45 %)	⟨ Adjonction d'un clapet sur le conduit de cheminée	51.7	33.5 % (+20 %)

Fig. 1 Tableau des différentes modifications structurelles

2.2.1. Résumé des améliorations structurelles effectuées entre 1999 et 2001

Les valeurs indiquées dans le tableau (voir figure 1) ont été calculées pour une installation Arpège munie de 12 m² de capteurs solaires et pour une maison dont la demande en énergie chauffage et en eau chaude sanitaire est d'environ 11'600 kWh/an.

Nous avons constaté que selon le tirage de la cheminée, d'importants courants d'air refroidissaient la chambre de combustion en phase d'arrêt du brûleur. L'ajout d'un clapet de cheminée sur une telle installation est toutefois assez délicat. On ne peut en effet pas poser un simple clapet mécanique engendrant une perte de charge importante non compatible avec le type de brûleur utilisé. Il faudrait donc équiper ce genre d'installation d'un clapet muni d'un moteur électromécanique. La pose d'un tel clapet diminue les pertes thermiques de 200 kWh/an et augmente le f_{sav} d'environ 0.7 points. Cependant, l'investissement pour la fabrication d'un tel clapet n'est économiquement intéressant que si son coût est inférieur à 100 CHF. Il n'existe pas sur le marché de clapet électromécanique bon marché et il semble relativement difficile d'en concevoir à un prix abordable. L'ajout d'un clapet n'est donc intéressant que d'un point de vue énergétique.

Après les améliorations apportées en 2000, nous avons examiné en 2001 toutes les possibilités de réduire encore la consommation d'énergie fossile en effectuant des modifications qui n'engendrent qu'un faible coût. La conclusion de nos réflexions est qu'il n'est plus possible de réduire cette consommation par des modifications structurelles simples. Pour réduire encore cette consommation il faudrait effectuer des grosses transformations synonymes de surcoût important. Quelles que soient les nouvelles modifications proposées, nous avions montré par simulation que les gains restent relativement faibles [2].

L'autre axe proposé qui ne devrait pas augmenter le coût de l'installation de manière trop importante est le remplacement de la commande actuelle par une commande optimale intégrant les prévisions météorologiques.

2.3. DEVELOPPEMENT D'UNE COMMANDE OPTIMALE

2.3.1. Objectifs de l'optimisation

Considérant les améliorations structurelles apportées à la cuve, il convient comme mentionné précédemment d'implanter une commande optimale afin d'améliorer davantage le rendement de l'installation.

Cette commande doit tirer profit de deux éléments essentiels pour atteindre cet objectif :

- La connaissance du système global
- La connaissance des prévisions météorologiques

La connaissance du système repose sur l'élaboration d'un modèle fin de l'installations solaire combinée Arpège [4] et du bâtiment [5]. Ce modèle compte près d'une centaine d'états (nœuds).

Les prévisions météorologiques utilisées sont l'ensoleillement global horizontal et la température extérieure. Elles sont fournies par l'Institut Suisse de Météorologie et disponibles en ligne.

2.3.2. La commande optimale

La stratégie de commande optimale consiste à déterminer sur un intervalle de temps donné les grandeurs de contrôle – les paramètres de l'optimisation - permettant de minimiser un certain critère – fonction coût - sous certaines contraintes.

1. Paramètres d'optimisation:

Les grandeurs physiques à disposition susceptibles d'améliorer notre critère sont:

- la puissance dissipée pour le chauffage du bâtiment
- la puissance fournie par les collecteurs solaires

Néanmoins, comme détaillé aux sections suivantes (2.3.3 et 2.3.4), seule la puissance de chauffage fait l'objet d'une commande optimale sur un vaste horizon, le solaire est optimisé par contre en temps réel.

2. La fonction coût:

L'objectif de l'optimisation consiste clairement à faire des économies sur la quantité d'énergie auxiliaire (consommation d'énergie fossile) nécessaire au fonctionnement de l'installation. Néanmoins, il convient de tenir compte de l'énergie emmagasinée dans le système, et tout particulièrement dans la cuve de stockage. Ceci est mis en évidence par bilan énergétique:

$$\Delta E_{stock} = E_{aux} + E_{sol} - E_{ecs} - E_{ch} - E_{pertes}$$

Où :

ΔE_{stock} Correspond à l'accroissement d'énergie thermique dans la cuve entre le début et la fin de l'intervalle de temps considéré.

E_{aux} Correspond à l'énergie auxiliaire, elle est fournie dans notre cas par le brûleur à gaz. Le brûleur étant commandé par un relais à hystérésis, cette énergie est délivrée par paquets de manière discontinue (voir figure 2).

E_{sol} Correspond à l'énergie récoltée par les capteurs solaires, servant à réchauffer la partie inférieure de l'accumulateur thermique. Cette énergie intervient lors que l'ensoleillement est suffisant.

E_{ecs} Correspond aux besoins en eau chaude sanitaire. L'eau chaude sanitaire (ECS) est produite à l'aide d'un double échangeur thermique, en haut et en fond de cuve. Celle-ci est délivrée à une température de 50°C à l'aide d'une vanne thermostatique qui effectue un mélange entre le flux chaud provenant du haut de la cuve et le flux froid du réseau d'alimentation.

E_{ch} Correspond à l'énergie utilisée pour le chauffage du bâtiment. Sur notre banc d'essai, cette énergie est dissipée par un ventilo-convector selon les besoins du bâtiment considéré.

E_{pertes} Correspond aux pertes thermiques de la cuve de stockage. Ces pertes sont non négligeables vis-à-vis du bilan énergétique. Ainsi, l'économie d'énergie porte sur la différence entre l'énergie auxiliaire et l'accroissement de l'énergie du stock :

$$J(\theta) = E_{aux}(\theta) - \Delta E_{stock}(\theta) = E_{ch}(\theta) + E_{ecs} - E_{sol}(\theta) + E_{pertes}(\theta)$$

Notre critère minimise ainsi les pertes de la cuve.

θ représente les paramètres à optimiser. Seule l'énergie de soutirage en ECS est indépendante de ces paramètres.

La commande optimale consiste donc à déterminer les paramètres optimaux θ^* tel que:

$$\underline{\theta}^* = \min_{\theta} J(\theta)$$

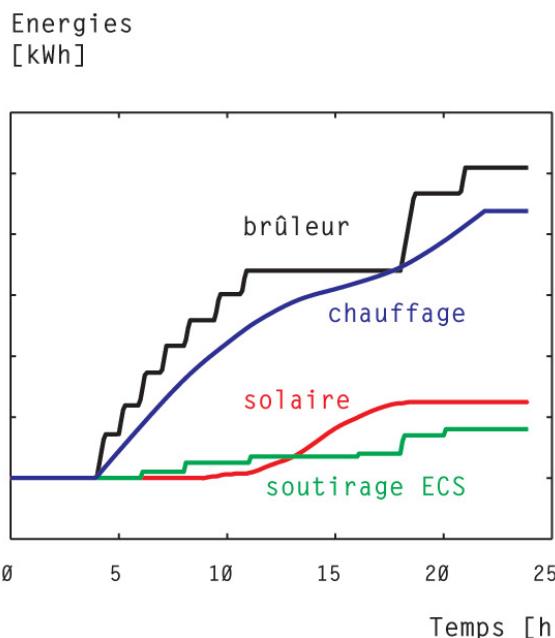


Fig. 2 Exemple de profils d'énergie sur une journée
(Extrait de la première journée du test de validation)

Les contraintes:

Les objectifs de confort sont exprimés en termes de contraintes. L'abaissement nocturne de température étant très répandu sur les installations in situ, nous avons décidé de poser les contraintes indiquées par la figure 3 sur la température intérieure. Soit, 16°C la nuit et 20°C pendant la journée.

D'autres contraintes techniques sont intervenues lors de l'optimisation. Une valeur maximale de 75°C pour la température de départ du chauffage a ainsi été imposée pour rendre la validation "physiquement" réalisable. De même, afin d'éviter les faibles régimes de chauffage difficiles à maîtriser techniquement sur le banc d'essai, une valeur minimale de 26°C a également été prescrite pour le départ chauffage. Au-dessous de cette valeur minimale, on considère être dans un régime de non -chauffage.

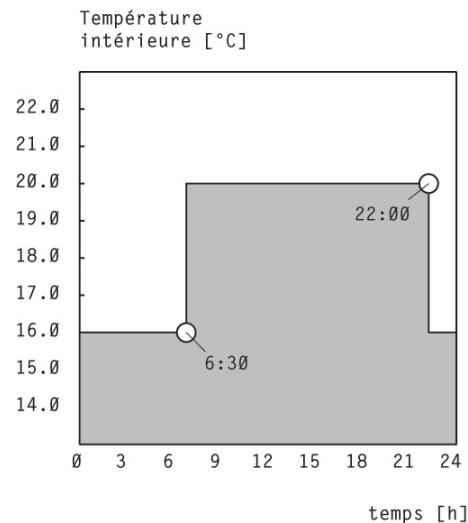


Fig. 3 Contraintes sur la température intérieure du bâtiment

Mentionnons ici que l'objectif de confort est exprimé par des contraintes rigides. Toute solution violant – même de peu – ces contraintes est systématiquement rejetée. Une alternative plus judicieuse consiste à attribuer un poids ou une pénalité proportionnelle au degré de violation de ces mêmes contraintes. Cette méthode permet d'exploiter pleinement le potentiel de la commande optimale et permet ainsi de minimiser davantage le critère, donc une optimisation plus efficace. Néanmoins, afin de comparer les performances de la commande équipant l'Arpège et la commande optimale dans les mêmes conditions, aucune tolérance sur la violation des contraintes n'a été admise.

2.3.3. Optimisation du débit solaire

La puissance solaire est réglée en modulant le débit de la pompe solaire. Ce débit n'est pas totalement variable sur sa pleine échelle, mais uniquement à partir d'un débit minimal :

$$\dot{V}_{sol,min} \approx 0.25 \cdot \dot{V}_{sol,max}, \text{ et varie donc sur les trois-quarts de son échelle.}$$

De nombreuses simulations ont mis en évidence le phénomène suivant :

Pour maximiser le transfert d'énergie solaire sur une journée, le débit optimal doit être en phase avec l'ensoleillement global horizontal [3].

Ainsi, toute anticipation ou retard du débit solaire sur l'ensoleillement provoque une nette diminution de l'apport solaire. Utiliser un large horizon – typiquement une journée – pour optimiser ce débit est par conséquent inutile. Il suffit de maximiser à chaque instant la puissance absorbée par les capteurs solaires :

$$P_{sol}(t) = \rho_{sol} \cdot \dot{V}_{sol}(t) \cdot cp_{sol} \cdot (T_{sol} - T_{bot})$$

Avec :

ρ_{sol} Densité massique du fluide solaire (glycol)

$\dot{m}_{sol}(t)$ Débit de la pompe solaire

cp_{sol} Chaleur massique du fluide solaire (glyc ol)

T_{sol} Température du capteur solaire

T_{bot} Température en bas de cuve

L'efficacité de l'échangeur solaire en bas de cuve est telle que les capteurs solaires sont ré-alimentés (retour du circuit solaire) quasiment à la température régnante en bas de cuve. Ceci engendre un couplage avec le reste du système – et tout particulièrement la boucle de chauffage – via la cuve. Ce problème est résolu en imposant à l'optimisation du chauffage de ne pas préférer le rendement de la boucle solaire, en évitant par exemple de s demandes en chauffage nécessitant l'enclenchement du brûleur lors d'apports solaires. Une telle action aurait en effet pour conséquence une élévation de la température de la cuve, nuisible au rendement solaire. Le critère défini au point (2.3.4) prend en compte implicitement l'efficacité du solaire.

L'optimisation "locale" du débit de la pompe solaire est réalisée par interpolation parabolique.

Cette méthode à pas variable consiste à évaluer localement l'efficacité de trois débits différents. Ces points définissent ainsi un polynôme du second ordre. (Voir figure 4).

Le maximum de ce polynôme est une approximation du débit optimum recherché. Ce débit calculé remplace ensuite le débit le moins performant. Cette procédure est exécutée de manière récurrente. En général, cette méthode localise rapidement le maximum, surtout dans le cas de fonctions lisses.

Prévue pour localiser des maximums statiques (indépendants du temps), elle est utilisée ici dans un cadre quasi-statique, le débit optimum variant constamment (Voir figure 5).

Cet algorithme a été implanté pour validation sur le système Arpège (voir annexe 4).

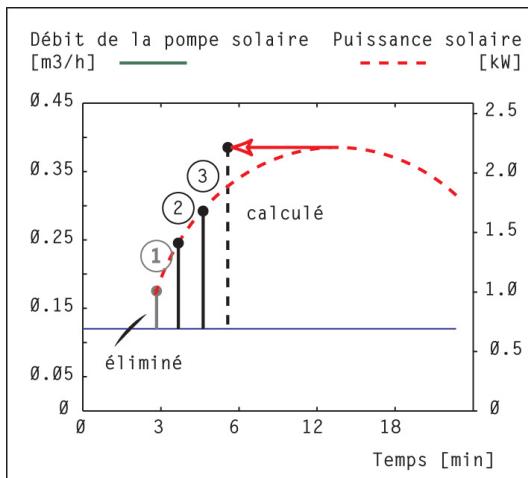


Fig. 4 Optimisation locale du débit solaire par interpolation parabolique

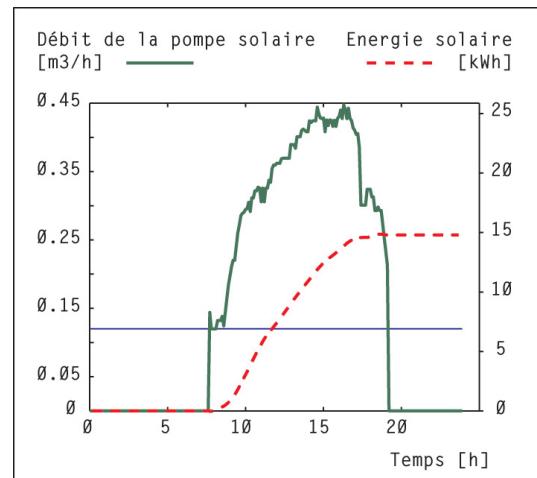


Fig. 5 Profil du débit solaire sur 24 heures obtenu par interpolation parabolique (simulation)

2.3.4. Optimisation de la puissance de chauffage

La dynamique lente du chauffage du bâtiment nécessite la réalisation de l'optimisation sur un intervalle de temps important. Le cycle naturel de fonctionnement d'une installation solaire impose un intervalle minimum d'optimisation portant sur vingt-quatre heures.

Techniquement, la puissance de chauffage est ajustée au moyen d'une vanne trois voies permettant de régler la température de départ du circuit de chauffage (Voir figure 6).

L'élément de chauffage utilisé dans le modèle du bâtiment est à un nœud. Ainsi, la puissance de chauffage vaut :

$$P_{ch}(t) = \rho_{eau} \cdot V_{loop} \cdot c p_{eau} \cdot (T_{départ}(t) - T_{retour}(t)) = g_{rad} \cdot (T_{rad}(t) - T_{int}(t))_n$$

Où :

ρ_{eau} : Densité massique de l'eau

V_{loop} : Débit volumique dans la boucle de chauffage

cp_{eau} : Chaleur spécifique de l'eau

$T_{départ}(t)$: Température de départ du circuit de chauffage, commandée par une vanne trois voies

$T_{retour}(t)$: Température de retour du circuit de chauffage, correspond à la température du radiateur dans le modèle à un nœud

g_{rad} : Conductance équivalente entre l'air et le radiateur

$T_{rad}(t)$: Température du radiateur, correspond à la température du retour chauffage dans le modèle à un nœud

$T_{int}(t)$: Température à l'intérieur du bâtiment

n : Exposant d'émission du radiateur

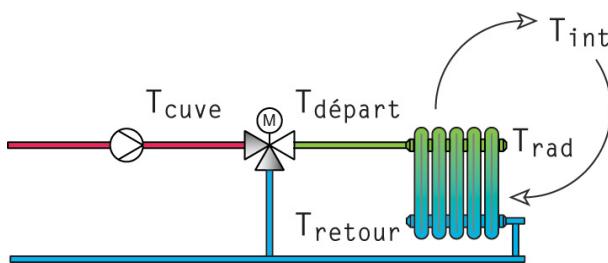


Fig. 6 Ajustement de la puissance de chauffage à l'aide de la vanne 3 voies

La réduction de la consommation du circuit de chauffage de la maison est ainsi possible grâce à l'exploitation des prévisions météorologiques et du modèle du bâtiment.

Il s'agit de déterminer le profil de température du circuit de chauffage permettant de tirer profit au maximum des gains solaires passifs.

Deux options se sont présentées pour réaliser l'optimisation de la température de départ du chauffage. Si seule la deuxième a été implantée, nous les exposons ici pour mieux cerner leurs avantages et inconvénients respectifs. Ces deux méthodes ont été baptisées :

- méthode non-paramétrique
- méthode paramétrique

1. Optimisation non-paramétrique :

Cette méthode consiste tout simplement à discréteriser le profil recherché – la température de départ chauffage – par pas temporel (une fraction d'heure) et d'optimiser l'amplitude de chaque segment du profil. Elle requerrait ainsi près d'une cinquantaine de paramètres par jour pour obtenir une résolution d'une demi-heure. Une résolution plus grossière ne se prêterait pas bien aux changements rapides des conditions météorologiques et à la discontinuité de la contrainte de température dans le bâtiment. En revanche, une résolution plus fine nécessiterait un nombre trop important de paramètres, provoquant une montée exponentielle du temps et de la puissance de calcul nécessaires à l'optimisation.

Autre inconvénient de cette méthode, le profil optimisé pourrait présenter des variations d'amplitudes importantes entre pas successifs, rien ne garantissant a priori l'obtention d'une allure "lisse". Ceci aurait pour fâcheuse conséquence de compliquer la validation sur le banc d'essai.

Le profil "idéal" représenté à la figure 7 fait uniquement figure d'illustration.

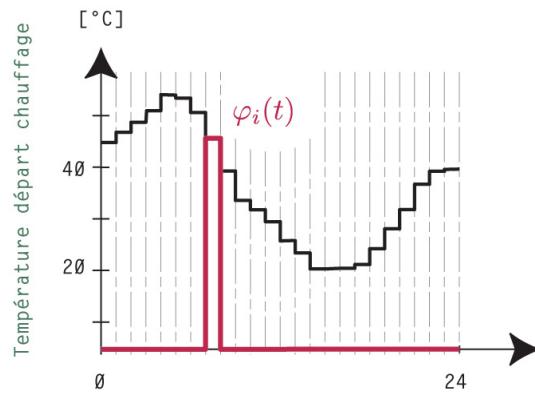
2. Optimisation paramétrique :

Cette méthode vise à tirer profit de la connaissance du comportement dynamique du chauffage du bâtiment sous les contraintes imposées.

En effet, l'abaissement de température nocturne (de vingt deux heures à six heures du matin) toléré dans le bâtiment suggère un arrêt puis une relance du chauffage. Ces deux instants doivent être optimisés (voir figure 8). La relance devant prendre fin à 06 :30h, un régime de stabilisation de la température intérieure autour des 20°C prend ensuite place jusqu'au prochain abaissement (22 :00h). Lors de cet intervalle, - la journée -, nous utilisons des fonctions de bases dérivées des prévisions météorologiques (température extérieure et ensoleillement global horizontal).

Le but étant de provoquer une baisse de la puissance de chauffage lors d'ensoleillement ou d'accroissement de la température extérieure.

Ces fonctions de bases normalisées sont – lors de l'optimisation - amplifiées par un facteur multiplicatif et déformées par un facteur de puissance afin d'obtenir le profil de température recherché (voir figures 9 et 10).



$$T_{depart}(t) = \sum_{i=1}^n \theta(i) \varphi_i(t)$$

Fig. 7 Optimisation non-paramétrique du profil de la température de départ du chauffage (profil fictif)

Fig. 8 a) Optimisation de l'enclenchement et du déclenchement du chauffage
b) Optimisation des quatre niveaux de température de départ

Fig. 9 Fonctions de bases dérivées de la prévision sur la température extérieure :
a) par déformation **b)** par amplification

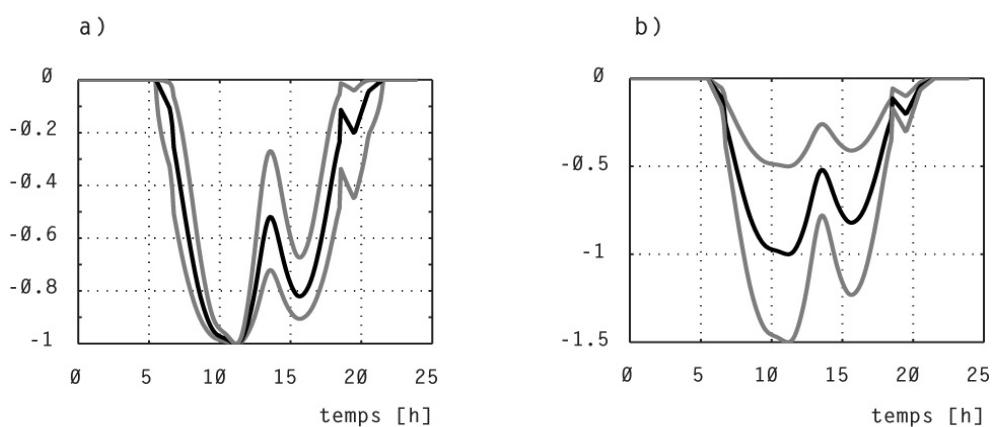


Fig. 10 Fonctions de bases dérivées de la prévision sur l'ensoleillement global horizontal
a) par déformation, **b)** par amplification

Ainsi, le profil de température de départ est optimisé à l'aide de seulement dix paramètres :

- deux paramètres pour les instants d'enclenchement et de déclenchement (voir figure 8.a)
- quatre paramètres pour les niveaux moyens de température (voir figure 8.b)
- deux paramètres pour l'amplification et la déformation de la fonction de base dérivée de la prévision sur la température extérieure (voir figure 9)
- deux paramètres pour l'amplification et la déformation de la fonction de base dérivée de la prévision sur l'ensoleillement global horizontal (voir figure 10)

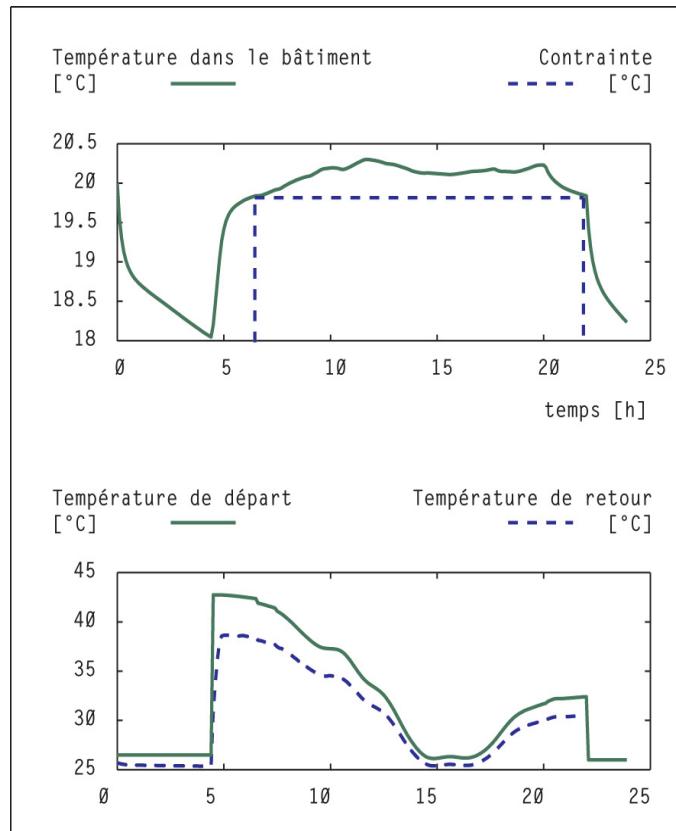


Fig. 11 Exemple d'optimisation non-paramétrique sur une journée

Un exemple¹ d'optimisation sur 24 heures est représenté à la figure 11.

Mis à part le saut correspondant à la relance du chauffage avant 6:30, le profil de température obtenu présente une allure lisse car il dérive des profils de température extérieure et l'ensoleillement qui sont eux-mêmes lisses. Les deux plateaux à 26°C correspondent aux périodes de non chauffage². L'optimisation complète des six jours du test figure à l'annexe 4.

¹ Ce profil a été optimisé dans les conditions météorologiques de la 1^e journée du test (voir section 2.3.7)

² Aucune puissance de chauffage n'est délivrée malgré l'écart entre le départ et le retour du chauffage car le débit est nul.

2.3.5. Commande de la température dans le bâtiment

But de la commande:

La commande optimale calcule un profil de température de départ du chauffage à partir d'un modèle du système et de prévisions sur les perturbations exercées sur ce même système. Dans la réalité, ni un modèle mathématique décrivant parfaitement le comportement du système ni les perturbations météorologiques ne sont connus avec précision. Une correction est donc nécessaire.

La figure 12 met en évidence la dynamique "à deux vitesses" du chauffage du bâtiment via le circuit de chauffage. Une première dynamique - rapide – correspond au transfert de chaleur direct entre l'air et le convecteur. L'autre dynamique – beaucoup plus lente – met en évidence l'inertie du bâtiment ralentissant le chauffage intérieur.

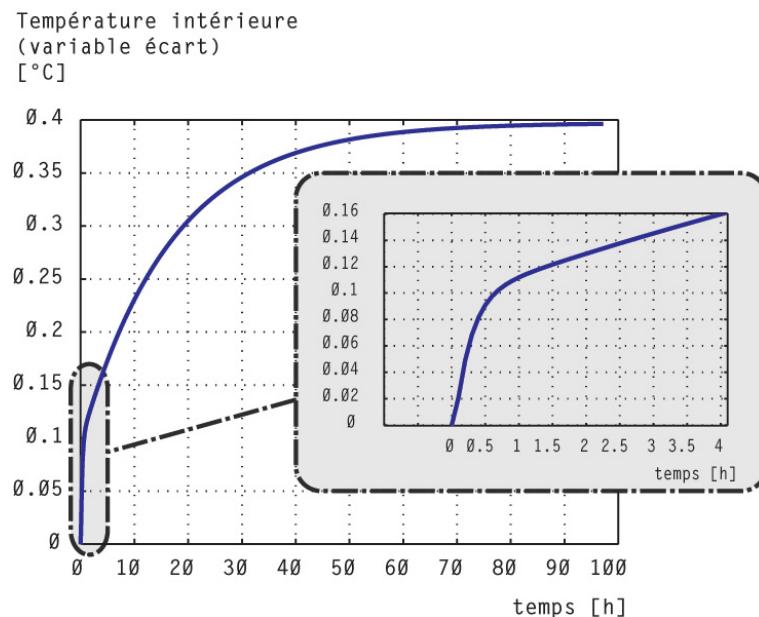


Fig. 12 Réponse de la température intérieure à un échelon sur la température de départ chauffage en boucle ouverte

Le modèle de simulation du bâtiment compte une cinquantaine de nœuds. Ces nœuds correspondent aux différentes couches des murs, des fenêtres, du plafond et du plancher qui constituent le bâtiment [4]. Ce modèle – non linéaire et d'ordre trop élevé – n'est pas propice à la synthèse d'une commande pour la température du bâtiment.

Un modèle linéaire d'ordre réduit reproduisant un comportement proche du modèle de simulation vis-à-vis de perturbations impulsionnelles sur la température de départ du chauffage a été identifié en appliquant le critère d'erreur de sortie³ (voir annexe 3).

³ Plus connu sous le nom "output error"

Ce modèle réduit est exploité pour la synthèse de la commande schématisée à la figure 13. Ce schéma de commande comporte deux composantes :

- Une commande anticipative
- Une commande avec rétroaction

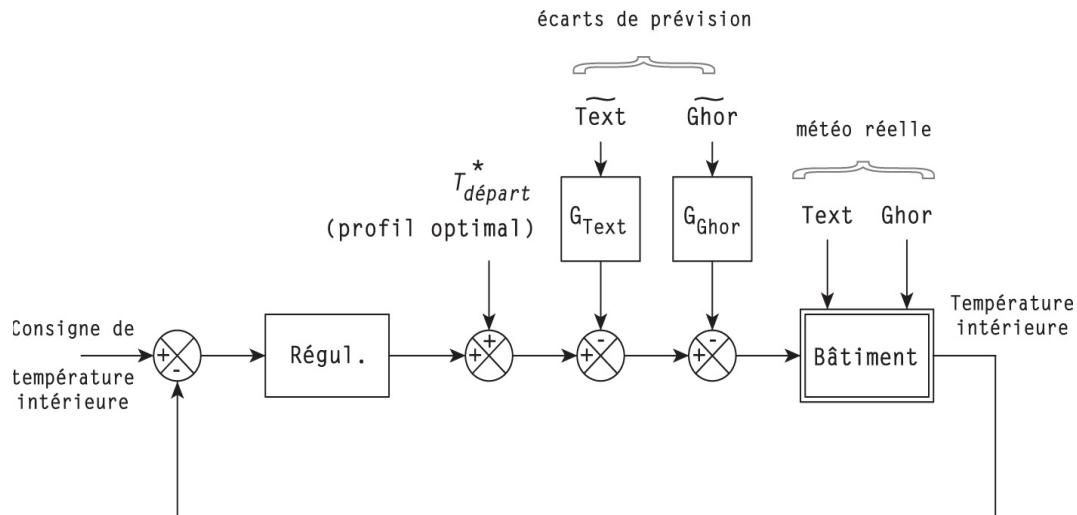


Fig. 13 Schéma de commande avec rétroaction et commande anticipative

Commande anticipative:

Le profil de température de départ du chauffage optimal est calculé sur la base de prévisions⁴ sur la température extérieure et l'ensoleillement global horizontal.

Une correction de la puissance de chauffage en fonction de l'erreur de prévision (écart entre les prévisions météorologiques et la météo observée) est alors nécessaire lors du fonctionnement de la commande.

Les deux filtres G_{Text} et G_{Ghor} (voir figure 13) pour la commande anticipative relative à l'erreur de prévision sont calculés en deux étapes (voir annexe 3) :

- Identification des modèles dynamiques réduits liants la température intérieure à l'erreur sur les prévisions météorologiques.
- Inversion du modèle du bâtiment : le modèle réduit du bâtiment précédemment identifié est inversé afin de déterminer l'action sur le chauffage nécessaire à la correction de la température intérieure.

⁴ naturellement erronées

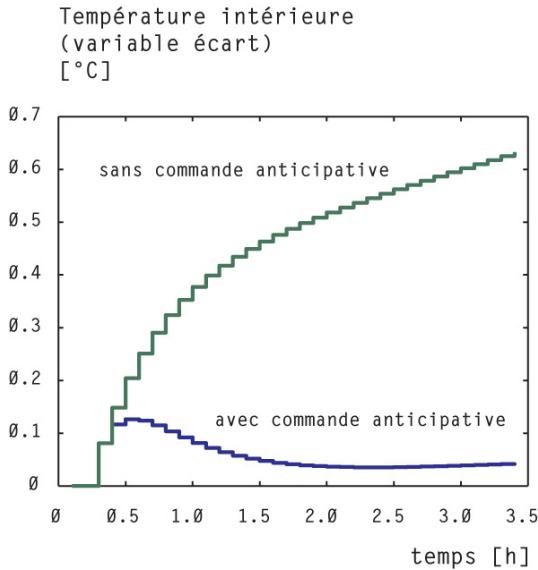


Fig. 14 Réponse de la température intérieure à une perturbation sur la température extérieure

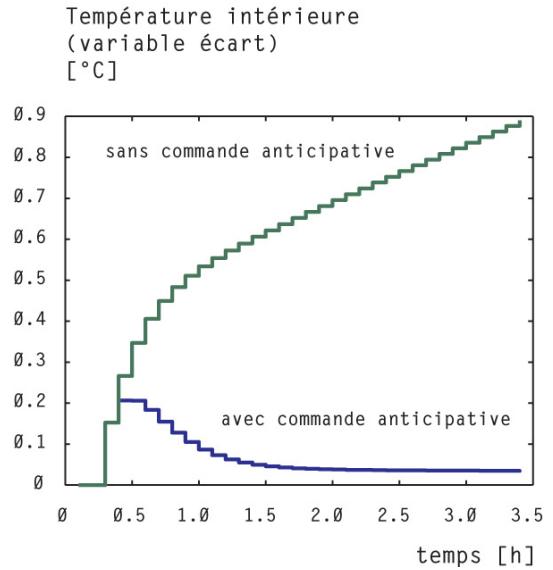


Fig. 15 Réponse de la température intérieure à une perturbation sur l'ensoleillement

Ainsi, la puissance de chauffage est ajustée de manière anticipative sur la base de l'erreur de prévision. Les figures 14 et 15 mettent en évidence la faculté de la commande anticipative à rejeter les perturbations en amont du système avant leur répercussion sur la grandeur en aval (la température intérieure). Néanmoins, ce rejet n'est pas total et nécessite une rétroaction sur la température intérieure pour tenir compte des incertitudes sur le modèle du bâtiment.

Commande à rétroaction:

La commande à rétroaction vise à corriger ce qui n'a pas pu l'être par la commande anticipative, après observation d'un écart sur la température ambiante.

Une manière élégante de synthétiser un tel régulateur consiste à spécifier un modèle en boucle fermée. Ceci permet en général d'obtenir de bonnes caractéristiques temporelles et fréquentielles (voir annexes 3) ainsi qu'un bon compromis entre la performance et la stabilité du régulateur ainsi calculé. Pour un modèle du premier ordre, l'adjonction d'un filtre passe-bas en combinaison avec le régulateur obtenu se révéla nécessaire afin d'atténuer l'effet de commande "à sonnette"⁵.

La réponse en boucle fermée est représentée aux figures 16 et 17 en variations autour des valeurs nominales (variables écarts).

⁵ Causé par un pôle négatif, à effet alterné : $(-|p|)^k$, $k = 1, 2, 3, \dots$

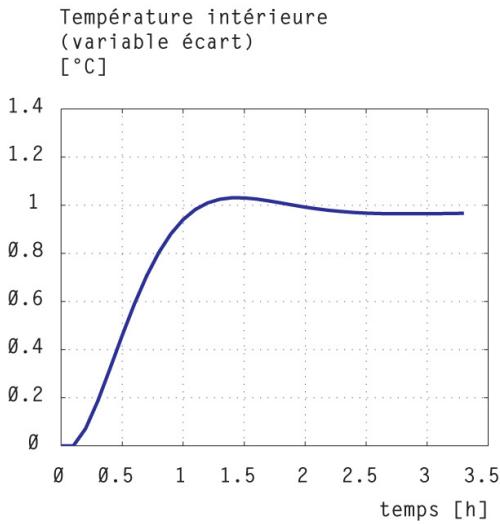


Fig. 16 Réponse indicielle de la température intérieure en boucle fermée

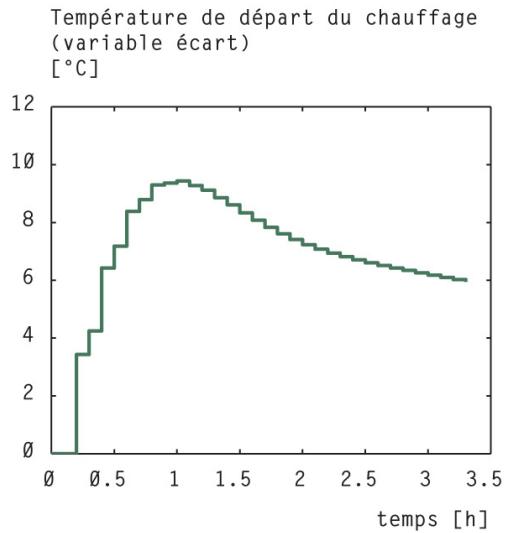


Fig. 17 Grandeur de commande (température de départ) en boucle fermée

2.3.6. Validation de la commande optimale

Le banc de mesure et de commande est piloté par trois ordinateurs (voir figure 18) :

- À partir du modèle dynamique de la maison virtuelle, l'ordinateur 1 effectue la simulation de la température intérieure en utilisant les paramètres de la maison, le fichier météo et la température mesurée sur la conduite de départ du chauffage. Cet ordinateur émule les radiateurs virtuels de la maison en actionnant les ventilo -convecteurs et la vanne trois voies et effectue des soutirages d'eau chaude sanitaire selon un horaire programmable. Enfin, l'ordinateur émule les températures intérieures et extérieures virtuelles lues soit par la commande d'Arpège, soit par la commande prédictive selon les essais réalisés.
- Les 12 m² de capteurs solaires sont émulés par un corps de chauffe électrique. Le fichier météo associé aux mesures effectuées sur le banc permet à l'ordinateur 2 d'émulter la température de retour des capteurs solaires.
- Lorsque l'installation est pilotée par la commande prédictive, c'est l'ordinateur 3 qui gère (à la place de la commande actuelle) le pilotage de la vanne trois⁶ voies ainsi que l'enclenchement et le déclenchement des pompes de circulation et du brûleur. Ainsi, ce troisième ordinateur valide sur l'installation les résultats de l'optimisation⁷ via à un programme de commande et d'acquisition développé à cet effet.

⁶ Vanne permettant de régler la puissance de chauffage du bâtiment.

⁷ Voir un exemple de validation à l'annexe 4

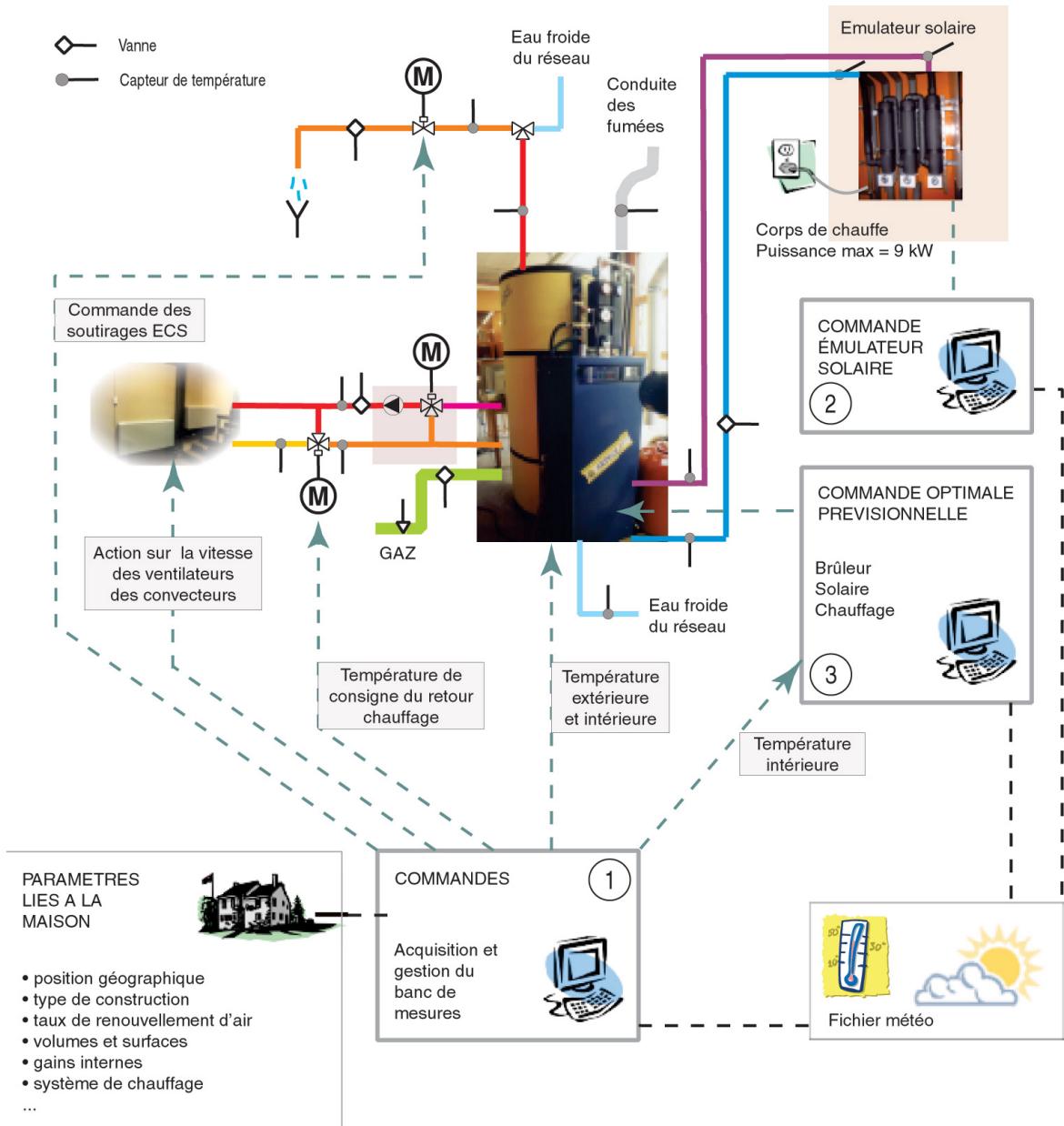


Fig. 18 Fonctionnement du banc de mesure et de la commande optimale

1.1.1. Conditions des essais en laboratoire

Introduction

Les tests réalisés sur le banc de mesures permettent de quantifier l'augmentation du confort et la diminution de la consommation d'énergie chauffage de la commande optimale par rapport à une commande standard. Les tests réalisés sont des tests de courte durée mais représentatifs. Les paramètres suivants ont été examinés :

- Fichier météorologique
- Qualité des prévisions météorologiques
- Caractéristiques thermiques du bâtiment
- Demande en eau chaude et en chauffage
- Perturbations

Choix du fichier météorologique

Nous avons choisi une période de mi-saison qui permet de mieux mettre en valeur les possibilités d'une commande anticipative. La validation du modèle par les mesures permet ensuite d'extrapoler les résultats sur une année.

Pour éviter des essais trop longs, nous avons choisi une durée de 6 jours. Une alternance entre période de chauffage et de non-chauffage a été réalisée pour observer le comportement d'anticipation de la commande prévisionnelle. Cette période d'essai comporte également des journées avec un ensoleillement varié afin d'observer la gestion des gains solaires.

Nous avons utilisé comme base de données *Meteonorm 97*. Les valeurs d'ensoleillement et de température sélectionnées sont en fait des collages de plusieurs séquences météo de la ville de Zürich. Nous avons choisi des températures et des ensoleilements pris pendant la mi-saison afin de pouvoir élaborer un fichier avec une variabilité climatique importante.

La qualité des prévisions météorologiques

Les prévisions données par l'ISM¹ permettent d'anticiper les gains solaires passifs. Une mauvaise prévision ne doit cependant pas diminuer notablement le confort. Il convient donc de déterminer quel degré d'erreur est tolérable dans les prévisions pour maintenir une qualité de confort au moins identique à une commande qui n'est pas pourvue de ce système de prévision météorologique. Dans ce dessein, nous observons l'évolution de la température intérieure en fonction de la qualité des prévisions. D'autre part, l'erreur ne doit pas entraîner une plus grande consommation d'énergie d'appoint par rapport à une commande conventionnelle.

¹ ISM : Institut Suisse de Météorologie

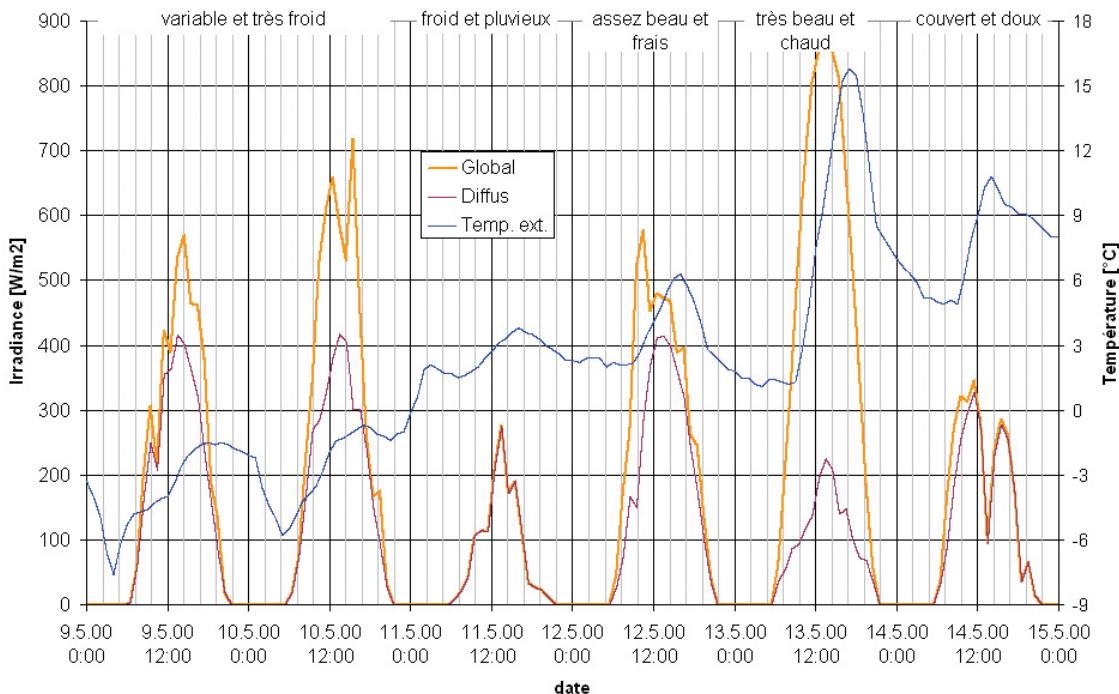


Fig. 19. Graphique des irradiances et de la température extérieure utilisée pendant les essais. Réalisé à partir de collage de séquences météorologiques tirées de la base de donnée Meteonorm 97 (ville de Zürich)

Nous avons limité à cinq le nombre de cas de prévisions :

- Variation 1 : Prévision parfaite
- Variation 2 : Prévisions ne contenant que de petites variations par rapport à la réalité : erreurs sur un temps variable quand il est difficile de prévoir si le ciel sera fortement couvert ou non d'une heure à l'autre.
- Variation 3 : Ecart de quelques heures sur la prévision d'arrivée d'éclaircies : cas où une perturbation part plus tard que prévu ou que le stratus se lève avec quelques heures de retard.
- Variation 4 : Erreurs sur les éclaircies : cas où le stratus ne se lève pas ou que le ciel reste couvert alors que des éclaircies importantes étaient prévues.
- Variation 5 : Erreurs sur les perturbations ; c'est l'inverse du cas précédent : cas où le stratus se lève ou que le ciel est dégagé alors que d'importants passages nuageux étaient prévus.

Il est important de noter que L'ISM fournit toutes les 12 heures une prévision météorologique pour les 48 prochaines heures. La commande recalcule ainsi toutes les 12 heures, en fonction des données mesurées et des dernières prévisions, l'énergie chauffage nécessaire qu'il faut fournir pour compenser les pertes thermiques (fig. 20).

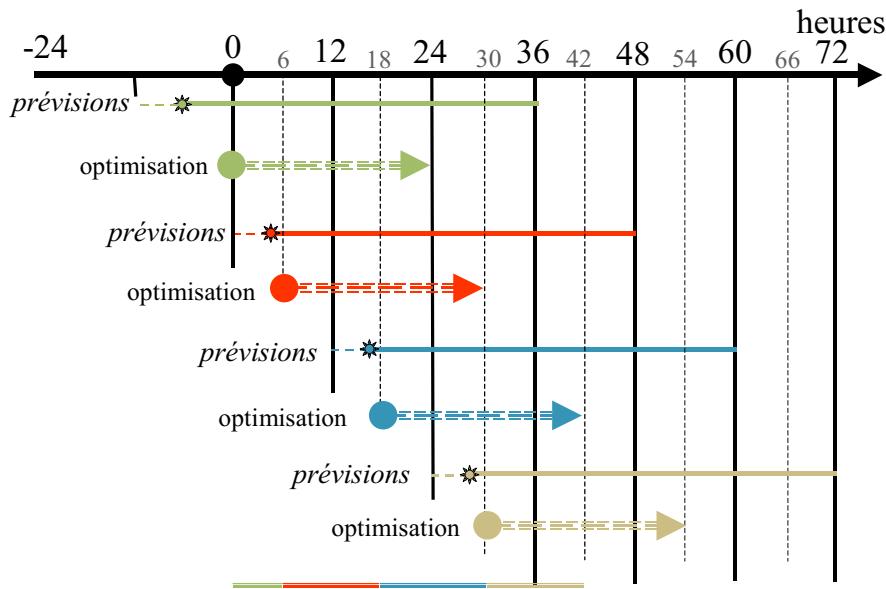


Fig. 20 Utilisation des fichiers de prévisions de l'ISM pour l'optimisation. Explications : A 0 h on utilise le fichier de prévisions établi par l'ISM 12 heures auparavant et envoyé vers 17 h 00. A 6 h, on utilise le fichier de prévisions établi par l'ISM à 0 h et envoyé vers 5 h 00. On change ensuite de fichier de prévision toutes les 12 heures.

Caractéristiques thermiques du bâtiment

Une commande prévisionnelle est intéressante principalement si le bâtiment peut stocker temporairement de l'énergie dans sa structure (dalle et murs). Un bâtiment avec une inertie importante permet d'éviter la surchauffe due à des gains solaires passifs importants si la commande anticipe ce gain en diminuant au préalable l'apport du chauffage. Le confort des habitants est amélioré (pas de surchauffe) et l'énergie n'est pas gaspillée par l'ouverture intempestive des fenêtres. Si le bâtiment a une faible inertie, la marge de travail de la commande est plus faible et elle ne peut donc pas exploiter de manière optimale le bâtiment comme stock thermique. Afin de déterminer l'influence du bâtiment sur une commande prévisionnelle il a été prévu d'effectuer plusieurs simulations sur des bâtiments avec des pertes thermiques et des inerties différentes.

- Construction 1 : Bâtiment avec une petite inertie et des grandes pertes thermiques
- Construction 2 : Bâtiment avec une grande inertie et des grandes pertes thermiques
- Construction 3 : Bâtiment avec une petite inertie et de petites pertes thermiques
- Construction 4 : Bâtiment avec une grande inertie et de petites pertes thermiques

A l'annexe 1 sont données les caractéristiques exactes des quatre bâtiments choisis.

Demande en eau chaude et en chauffage

Eau chaude sanitaire : nous avons choisi des soutirages d'eau chaude sanitaire (ECS) répétitifs qui s'élèvent à 8 kWh par jour. Pour assurer le confort attendu par les consommateurs, il faut contrôler, lors des séquences de test, que la commande fournit de l'eau chaude à une température minimum de 50°C.

Chauffage : nous avons choisi les contraintes de chauffage selon la description qui figure dans le paragraphe « contrainte sur la température intérieure » ci-après. Les essais et les simulations utilisent un modèle simple de convecteur qui permet de valider la qualité de la commande anticipative par rapport à une commande « ordinaire ». Il paraît évident que l'intégration d'un modèle de dalle chauffante est indispensable, puisque le 80 % des installations Arpège vendues sont installées dans des maisons équipées d'un chauffage par le sol. Étant donné l'inertie d'un tel mode de chauffage, la commande prévisionnelle doit permettre d'améliorer le confort des occupants tout en modérant la consommation d'énergie d'appoint.

La robustesse de la commande face aux erreurs et aux perturbations

La commande doit être capable de corriger les erreurs de paramétrage en modifiant notamment la courbe de chauffage automatiquement. Cette fonction existe déjà sur quelques commandes commercialisées, telle que celle installée sur Arpège. Parmi les paramètres qui entraînent les erreurs permanentes les plus courantes, on trouve :

- l'inertie du bâtiment
- les pertes thermiques
- le renouvellement d'air

Si ces erreurs sont directement liées à l'entrée des paramètres dans le module de commande, d'autres méprises proviennent de l'activité des occupants de la maison (ouverture et fermeture des fenêtres et des portes, feu de cheminée...). Ces pertes ou ces apports d'énergie sont très difficilement prévisibles. Il est donc indispensable d'éprouver également la capacité de la commande à distinguer des événements imprévisibles et sporadiques, d'une erreur récurrente.

Remarques : l'emplacement de la sonde de température intérieure près d'une source chaude est une erreur courante que peut difficilement prendre en compte une commande.

Nos tests permettent d'expérimenter ce qui se passe en particulier dans 2 cas précis :

- perturbation 1 : erreur permanente sur les pertes et l'inertie du bâtiment
- perturbation 2 : renouvellement d'air variable et apports de chaleur sporadiques (ex : poêle)

A l'annexe 2 se trouve les l'évolution du renouvellement d'air pendant les essais qui ont été effectués.

2. COLLABORATION NATIONALE

Une collaboration avec l'entreprise AGENA énergies S.A., fabricant d'installation solaire, nous permet de profiter d'un apport logistique. Un transfert technologique a aussi permis l'introduction de certaines améliorations dans la fabrication de la centrale d'énergies Arpège.

3. COLLABORATION INTERNATIONALE

Dans le cadre de la tâche 26-Solar combisystems de l'IEA-Solar heating and cooling programme, une collaboration avec différents groupes de travail est en cours. Le but de cette tâche est de promouvoir les installations solaires combinées, de tester ce type de système et de mettre en évidence sur les installations sélectionnées les solutions les plus performantes apportées par les fabricants à des fins d'optimisation.

Nos principales contributions à cette tâche ont été notre collaboration lors de la définition de critères permettant l'inter-comparaison des systèmes, le choix des paramètres de simulations et les résultats obtenus par simulation de l'installation Arpège. Un de ces résultats a montré une économie d'énergie d'appoint variant entre 20 et 50% pour le climat du plateau suisse selon la demande d'énergie-chaleur du bâtiment.

Dans cette tâche 26, des outils de comparaison sont en cours de développement. En confrontant les premiers résultats des différentes équipes, il semble en ressortir quelques règles de bases. L'influence la plus importante sur l'efficacité d'une installation serait le rendement de combustion de la partie appoint. Vient ensuite l'isolation de la cuve. Dans une moindre mesure le volume de la cuve influence le taux d'économie d'énergie d'appoint. Bien sûr, le rendement des capteurs influence le rendement global d'une installation solaire, mais dans l'état actuel de la technique, tous les capteurs plans ont des rendements proches les uns des autres.

Il semblerait donc que l'importance du type de système solaire (une ou deux cuves, chaudière externe ou intégrée...) soit faible, mais que le choix des composant soit prépondérant. Cette conclusion restera d'actualité tant qu'il y aura de grandes disparités de performance pour un même composant.

4. ÉVALUATION DE L'ANNEE 2001 ET PERSPECTIVES POUR 2002.

4.1. MESURES IN-SITU

Nous avons réussi à enregistrer une année complète de mesures sans pratiquement aucun trou. Cela nous a permis d'effectuer une comparaison très complète entre les mesures et la simulation. Ces mesures ont permis de vérifier la pertinence de l'outil de simulation TRNSYS. Nous avons arrêté la campagne le 1 juillet 2001.

4.2. MESURES THERMIQUES ET AMELIORATIONS STRUCTURELLES

Les mesures du champ de températures dans l'accumulateur thermique à l'aide de 55 sondes ont permis de confirmer la présence de forts mouvements convectifs dans la partie supérieure de l'accumulateur solaire lorsque le brûleur se met en marche. Par contre, la stratification régnant entre le bas de la cuve et la partie supérieure n'est pas affectée lorsque le brûleur est en marche. Nous avons constaté que les mouvements de masse régnant dans l'accumulateur sont parfois très rapides. Pour parvenir à visualiser correctement ces mouvements, il aurait fallu réaliser l'acquisition des 55 mesures en moins de 1 seconde contre 5 secondes actuellement. D'autre part, environ 2 fois plus de sondes auraient dû être installées.

Les améliorations sur la structure d'Arpège que nous avons effectuées durant l'année 2001 n'apportent pas une augmentation significative du taux d'économie d'énergie d'appoint. Nos simulations démontrent d'ailleurs que ce sont essentiellement l'augmentation de l'efficacité du brûleur ainsi qu'une meilleure stratification de la charge solaire dans l'accumulateur qui peuvent encore augmenter ce gain.

En 2002, il faudrait concentrer nos efforts sur la commande prédictive qui doit permettre d'augmenter encore le taux d'économie d'énergie d'appoint pour un surcoût qui devrait être faible. Une étude de marché, à entreprendre en marge du projet 2002, devrait le confirmer.

4.3. COMMANDE OPTIMALE PREDICTIVE

- La carte développée pour effectuer les acquisitions et la commande a été perturbée par les influences électromagnétiques importantes régnant au laboratoire d'essais. Les mesures manquaient de précisions ce qui n'a pas permis d'effectuer des campagnes de mesures dans les délais prévus.
- Le local dans lequel sont situés les ventilo-convection chargés d'émuler les radiateurs présentait une température trop élevée pendant plusieurs semaines, ce qui a perturbé le début des essais.
- Une des difficultés principales a résidé dans l'instabilité des systèmes informatiques utilisés pour effectuer les campagnes de mesures. Sur les trois ordinateurs exploités pour les mesures et la commande, il est arrivé fréquemment que l'un d'eux ait des problèmes.

Ces difficultés nous ont obligés à reporter le début de la campagne de tests de plusieurs semaines.

4.4. COLLABORATION INTERNATIONALE

La collaboration internationale réalisée avec la tâche 26 devait permettre une comparaison et une proposition de concepts d'installation idéale en la fin de l'année 2001. Ce travail ayant pris du retard, il est prévu de prolonger ce délai d'une année. Pour cette raison les résultats ne sont que partiels.

Cependant, une telle collaboration permet de mettre en commun divers problèmes rencontrés durant nos études :

- stand de test
- séquences de test
- problèmes liés aux simulations TRNSYS
- problèmes techniques (chambre de combustion, stratification...)
- ...

5. REFERENCES

- [1] J. Bony et O. Renoult, "Résultats d'une campagne de mesures in situ d'une installation solaire combinée". *Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO)*, EIVD, LESBAT, Rte de Cheseaux 1, CH-1400 Yverdon-les-Bains, Suisse, Août 2001.
- [2] J. Bony; O. Renoult; T. Pittet; Ph. Dind; A. Gherbi; T. Prud'homme; and D. Gillet, "Optimisation of Combisystems". *Energie Solaire et Bâtiment CISBAT 2001*, pp. 367 – 372, EPFL, 1015 Lausanne, Suisse.
- [3] T. Prud'homme, and D. Gillet, "Advanced Control Strategy of a Solar Domestic Hot Water System with a Segmented Auxiliary Heater", *Energy and Buildings Journal*, Vol. 33, No. 5, pp. 463-475, May 2001.
- [4] L. Pedrinis. Travail de diplôme: "Modélisation d'une installation solaire combinée eau chaude-chauffage". *École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*, DGM-IA, Écublens, CH-1015 Lausanne, Suisse, Mars 2000.
- [5] M. Bauer, "Modélisation d'un bâtiment pour un système solaire combiné", Rapport de synthèse, *Estia sàrl : PSE-B Parc scientifique de l'EPFL*, CH-1015 Lausanne, Novembre 2000.